

Topraklayıcılarda potansiyel dağılımının iki ve üç boyutlu sayısal analizi

Okan İhsan ÖZTÜRK*, **Özcan KALENDERLİ**

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

Özet

Topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımının bilinmesi, canlılar için hayati tehlike oluşturabilecek adım geriliminin genliğinin ve değişiminin bilinmesi açısından önemlidir. Bu çalışmanın amacı, farklı topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımını, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri ile, topraklayıcı boyutuna, geometrisine, konumuna ve toprak yapısına bağlı olarak incelemek ve güvenli çalışma koşullarını belirlemektir. Toprak öz direnci ile toprak dielektrik sabiti arasındaki ilişkiden yararlanılarak yerel ve mevsimsel etkilerle topraklayıcı çevresindeki toprağın cinsinin ve nemliliğinin değişiminin, topraklayıcı davranışına etkileri incelenmiştir. İncelemeler, topraklayıcılar çevresinde potansiyel dağılımlarının önerilen yaklaşım ve yöntemlerle kolay ve gerçeğe uygun olarak bulunabileceğini ve tehlikeli koşulları yaratmayacak şekilde topraklayıcıların tasarlanabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Topraklama, potansiyel dağılımı, sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi.*

2D and 3D numerical analysis of potential distribution around grounding electrodes

Abstract

The aim of this paper is to show that, different models can be developed to determine potential distribution around different grounding electrodes and the computations on those models can be carried out more effectively by a new approach using Finite Difference Method (FDM) and Finite Element Method (FEM). In calculations, type and humidity of the soil surrounding the grounding electrode and differences in soil dielectric constants, are considered. Therefore, in this study instead of corresponding soil resistivity, soil dielectric constants are used. In this paper, potential distributions and step voltages have been computed in different coordinate systems for grounding electrodes which may have different shapes, different buried depths in the serial and parallel soil layers. A new technique called Cellular Equation Solution has been developed in MS Excel program using the FDM for computations of two and three-dimensional potential distribution. It has been shown that, large scaled equation systems can be established and solved easily and in a short time by this new method. Detailed studies on the models have been carried out with FEM for analyzing systems those models have been solved by the FEMM (Finite Element Method Magnetics) packet program. The results obtained using analytical and numerical methods have been compared and it has been shown that the results are compatible and the methods are applicable.

Keywords: *Grounding, potential distribution, finite difference method, finite element method.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Okan İhsan ÖZTÜRK. okozturk@gmail.com; Telefon: (0212) 285 67 59.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Geçici aşırı gerilimlerin topraklanmasında toprak ve topraklayıcıların davranışının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 22.11.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 10.06.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Topraklama sistemleri, elektrik tesislerinde yıldırım boşalmaları veya kısa devreler gibi olumsuz koşullarda oluşan aşırı gerilimlere karşı canlıları ve aygıtları korumak bakımından etkili bir önlemdir. Basit bir topraklama sistemi, topraklanacak yeri toprağa bağlayan topraklama iletkeninden, bu iletkenin toprak bağlantısını sağlayan topraklayıcıdan ve topraklayıcıdan akımın dağıldığı ortam olan topraktan oluşur. Bu sistem içinde en önemli elemanlardan birisi topraklayıcıdır. Çünkü bir topraklayıcı, özelliklerine göre, üzerinden akım aktığında kendisi ile, referans toprak olarak adlandırılan ve potansiyel değerinin yaklaşık 0 volt olarak kabul edildiği bölge arasında oluşan potansiyel dağılımını belirler. Uygulamada referans toprak, topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki toprak bölümü olarak alınır. Bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının bilinmesi, çevresinde oluşan ve canlılar için yaşamsal tehlike olabilecek adım ve dokunma gerilimlerinin genliklerinin ve değişimlerinin bilinmesi açısından önemlidir. Potansiyel dağılımına topraklayıcının boyu, çapı, gömülme derinliği, gömüldüğü toprağın cinsi, yapısı ve özdirenci gibi etkenler etki eder (Bayram, 2000; Kaşıkçı, 2002).

Bir topraklama tesisinin toplam direnci, toprak geçiş, topraklama iletkeni, topraklayıcı yayılma ve toprak zemininin dirençleri toplamıdır. Topraklayıcı yayılma direnci yanında diğer dirençler ihmal edilebilecek kadar küçük olduklarından topraklayıcı direnci olarak sadece topraklayıcı yayılma direnci alınabilir. Yayılma direnci topraklayıcı uzunluğuna ve çapına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bazen topraklayıcı boyunun iki katına çıkarılması durumunda topraklayıcı direnci üzerindeki meydana gelen azalma, topraklayıcı çapının iki katına çıkarılması durumunda meydana gelen azalmaya oranla iki kat daha fazla olur. Bu da yayılma direnci bakımından topraklayıcı çapının değil, uzunluğunun daha önemli olduğunu gösterir. Topraklamanın uygulanacağı yere bağlı olarak topraklayıcı seçiminin de ayrı bir önemi vardır. Bu amaçla gerek topraklayıcı direnci gerekse potansiyel dağılımına yönelik literatürde deneysel, sayısal ve analitik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çar-

lışmaların çoğunda topraklayıcıların yıldırım darbe akımı altındaki performans analizleri, toprak ve topraklayıcıların modellenmesi ile yapılmıştır. Bu çalışmalarda topraklayıcı olarak çoğunlukla topraklama ağırları kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalarda elektriksel eşdeğer devre teorisi, iletim hattı teorisi ve elektromanyetik alan teorileri olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır. Toprak ve topraklayıcının devre ve iletim hattı modelleri çoğunlukla toprak darbe empedansının hesaplanması için kullanılmıştır. Elektromanyetik alan yaklaşımı ise büyük ve karmaşık topraklama ağırları için iki nokta arasındaki toprak potansiyelinin hesaplanmasında kullanılmıştır (Chonghui, vd., 2003; Gonos vd., 2003; Heimbach ve Grcev, 1997; Lorentzou ve Hatziargyriou, 2000; Thapar ve Puri, 1967; Geri, 2000; Dawalibi ve Mukhedkar, 1979).

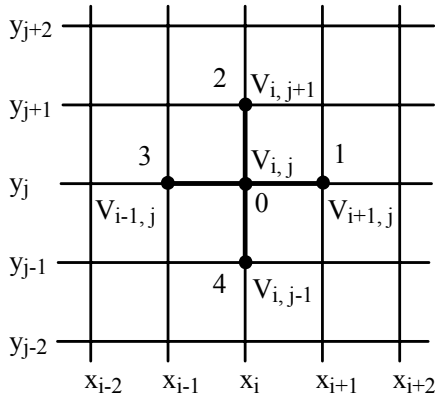
Bu çalışmada, topraklayıcı türü olarak sık kullanılan çubuk, şerit ve küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesabı, sonlu farklar yöntemi (SFY) ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile iki boyutlu ve üç boyutlu silindrisel, küresel ve kartezyen koordinat sistemlerinde özgün modeller geliştirilerek, yapılmıştır. Bu amaçla çeşitli topraklayıcıların sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemi için modelleri kurulmuş ve bu modeller üzerinde çözümler, hesaplama ilkesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM 4.0 (Finite Element Method Magnetics) ve MS Excel tablolama programları ile yapılmıştır.

Topraklama konusunda toprak özelliği, genellikle toprak özdirenci göz önüne alınarak değerlendirilir. Bu çalışmada farklı bir yaklaşım olarak toprağın özdirenci yerine özdirenç değerlerine karşılık gelen dielektrik sabitleri göz önüne alınmıştır. Bu durum, topraklayıcı çevresinde değişik toprak yapıları ve düzenleri için potansiyel dağılımlarını belirlemede modelleme ve çözümlene kolaylığı yaratmıştır. Çünkü statik elektrik alanı çözümlenmesi bakımından toprağın bağıl dielektrik sabitini parametre olarak kullanmak büyük kolaylık sağlamıştır. Aşağıda önce bu çalışmada kullanılan yöntemler tanıtılmış, geliştirilen modeller ve sonuçları verilmiştir.

Sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri

Sonlu farklar yöntemi

Sonlu farklar yöntemi (SFY), potansiyel dağılımı hesaplarında da kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlkesi, potansiyel dağılımı Laplace veya Poisson denklemiyle verilmiş kapalı bir bölgede, sayısal çözümlemedeki sayısal türev konusundan bilinen türevler için sonlu fark denklemlerini kullanarak potansiyel dağılımını hesaplamaya dayanır. Bunun için örneğin iki boyutlu problemlerde, inceleme bölgesi kare, dikdörtgen veya üçgen gözleri olan bir ağa bölünür (Şekil 1).



Şekil 1. SFY için kartezyen koordinatlarda, iki boyutlu kare gözülü ağ örneği

Ağın düğüm noktalarında Laplace veya Poisson denklemlerinin sonlu fark denklemi karşılıkları yazılır. Böylelikle bilinmeyen düğüm potansiyelleri ve sınır koşullarından değerleri bilinen düğüm potansiyellerini içeren bir lineer denklem takımı elde edilir. Bu lineer denklem takımı bir sayısal yöntemle çözülerek bilinmeyen düğüm potansiyelleri bulunur.

Bu çalışmada kare gözlerle sahip bir ağ yapısı kullanılmıştır. Problemin geometrisine uygun olarak sonlu fark denklemleri silindirselsel, küresel ve kartezyen koordinatlarda yazılmıştır. Silindirselsel koordinatlarda iki boyutlu Laplace denklemidir.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Küresel koordinatlarda alanın yarıçap r boyunca değişmesi durumunda bir boyutlu Laplace denklemi

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

ve kartezyen koordinat sisteminde üç boyutlu Laplace denklemi

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

olarak verilir. Bu denklemlerde, V elektriksel potansiyeli, diğer büyüklükler ise koordinat sistemi değişkenlerini göstermektedir. (1) denkleminin sonlu farklar karşılığı olan ifade,

$$V_{i,j+1} + V_{i,j-1} + \left(1 + \frac{h}{2r}\right)V_{i+1,j} + \left(1 - \frac{h}{2r}\right)V_{i-1,j} - 4V_{i,j} = 0 \quad (4)$$

olacaktır. Ağın potansiyeli bilinmeyen her düğümü için yazılan bu denklemde, h ağın göz genişliği veya adım büyüklüğü, r ise denklemin yazıldığı düğümün koordinatıdır. Benzer şekilde küresel ve kartezyen koordinat sistemi için de sonlu farklar ifadeleri yazılabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi

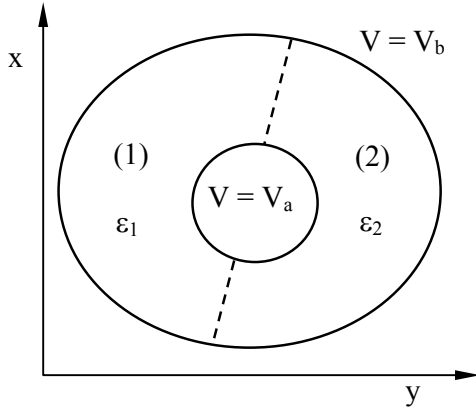
Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) elektrik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi (minimumlaştırılması) ilkesine dayanır. Bölge içindeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik alanı olabilir. Sonlu elemanlar yönteminde de diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir.

Şekil 2'de iki boyutlu, sınırlardaki potansiyel değerleri (V_a ve V_b) verilmiş (Dirichlet tipi) bir A bölgesi gösterilmiştir. Bölge kesikli çizgi ile (1) ve (2) alt bölgelerine ayrılmıştır. Alt bölgelerin ara kesitinde serbest yüklerin bulunmadığı

ve koşulların bilindiği varsayılır. Bölge içindeki toplam enerji

$$W = z \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[\varepsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada z sabittir. Buradan yazılacak $w = W/z$ bağıntısı z uzunluğu başına enerji yoğunluğunu gösterir. ε_x ve ε_y elektrik alanın yönüne bağlı olarak değer alan dielektrik katsayılarıdır.



Şekil 2. İki boyutlu bölge

Enerji bağıntısından yararlanarak enerjiyi minimum yapan potansiyel değerlerini bulabilmek için öncelikle katsayıları henüz bilinmeyen ve basit işlevlerin toplamından oluşmuş bir $V(x, y)$ potansiyel yaklaşım işlevinin tanımlanmış olması gerekir. Tanımlanacak bu potansiyel işlevinin bölge içinde sürekli olduğu ve sonlu sayıda türevi bulunacağı göz önünde tutulmalıdır.

Bir çözüm bölgesi içinde sınır koşullarını sağlayan birden fazla potansiyel işlevi elde etmek olasıdır, ancak bunlardan bir tanesi

$$\nabla^2 V = \Delta V = 0 \quad (6)$$

Laplace denklemini sağlar ve bu işlev tektir. Laplace denklemini sağlayan bu çözüm aynı zamanda bölge içindeki potansiyel enerjiyi minimum yapan çözümdür. Bunun tersi de söylenebilir, yani, bölge içinde enerjiyi minimum yapan potansiyel çözümü, Laplace denklemini

sağlayan potansiyel çözümdür. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini çözmek yerine, enerji denklemini minimum yapan bir potansiyel çözümünü bulmak yoluna gidilir.

Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü temel olarak dört adımda gerçekleştirilir:

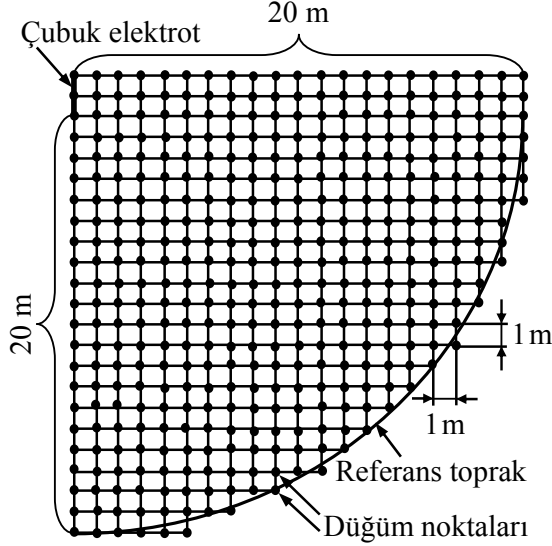
- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması,
- Her bir eleman için temel denklemlerin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü (Kalenderli, 1996).

Çubuk topraklayıcı için potansiyel dağılımının sayısal analizi

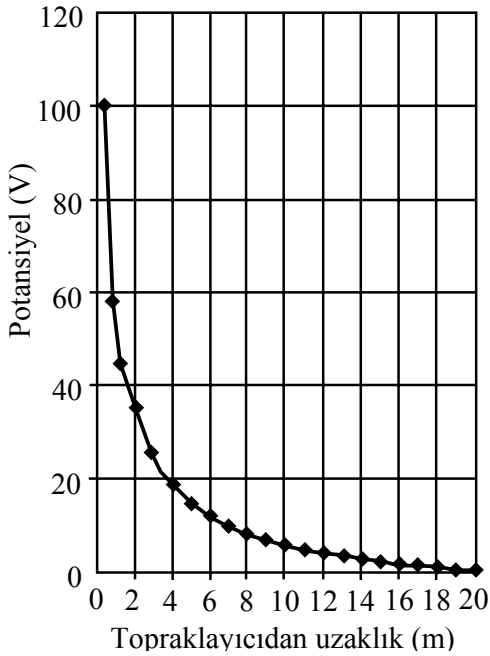
Çubuk topraklayıcılar genellikle 25 mm çapında çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten yapılırlar ve zemine dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcıların uzunluğu 3-5 m kadardır. Potansiyel dağılımının bulunması amacıyla SFY kullanılarak oluşturulan modellerde hesaplama kolaylığı açısından topraklayıcıya uygulanan gerilim 100 volt ve topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki bölümler referans toprak yani potansiyeli 0 volt olan noktalar kabul edilmiştir.

Çubuk topraklayıcı için geliştirilen modellerde, topraklayıcı ile referans toprak arasındaki bölge kare gözlerden oluşan düzgün ağlara bölünmüş ve her bir ağı oluşturan düğüm potansiyellerin iki boyutlu silindrsel koordinatlarda sonlu fark denklemleri yazılmıştır. Elde edilen denklem sisteminden bilinmeyen düğüm potansiyelleri, hücresel çözüm yöntemi adı verilen bir yöntemle hesaplanmıştır. Şekil 3'te çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla kurulan model görülmektedir. Modelde çubuk topraklayıcı, yer yüzeyine dik olarak gömülü ve üst ucu yer yüzeyi ile aynı seviyede olacak şekilde alınmıştır. Çubuk topraklayıcının aksel simetrisi nedeniyle SFY ile yapılan incelemede problemin yarı bölgesinde çözüm yapılmıştır.

Şekil 3'teki sonlu fark modelini göz önüne alarak 5 m uzunluğundaki bir çubuk topraklayıcı için yapılan potansiyel hesabından Şekil 4'teki potansiyel dağılımı elde edilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır.

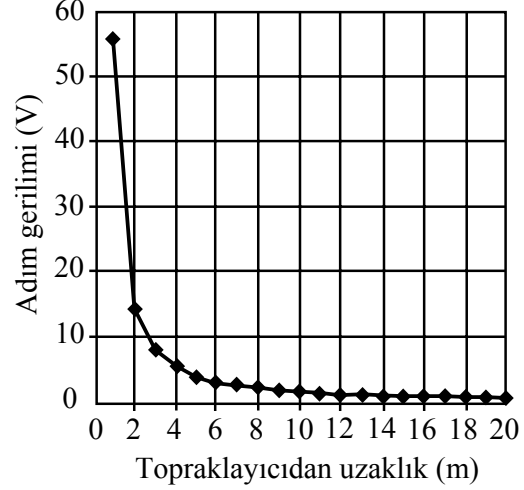


Şekil 3. Çubuk topraklayıcı için SFY modeli



Şekil 4. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için SFY ile bulunan potansiyel dağılımı

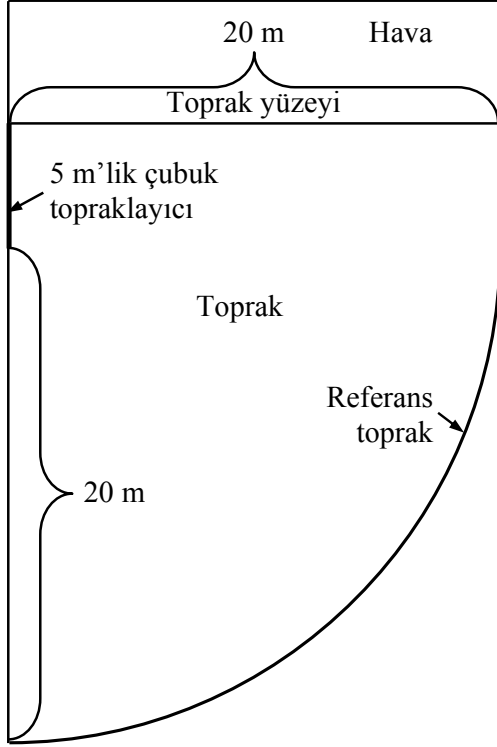
Buna bağlı olarak aralarında 1 m açıklık bulunan iki ayak arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlanan adım gerilimi de Şekil 5'te görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 5. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için adım geriliminin uzaklıkla değişimi

Toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımının bilinmesi özellikle topraklayıcı çevresinde bulunabilecek canlılar için önem taşımaktadır. Çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarda ve farklı gömülme derinliklerinde olması durumunda da potansiyel dağılımının incelenmesi gerekir. Çubuk topraklayıcı boyunun uzaması, topraklama direnci üzerinde topraklayıcı çapının büyümesine oranla yaklaşık iki kat daha fazla bir azalma meydana getirir. Buna bağlı olarak da toprak yüzeyindeki potansiyel farkları azalır. Toprak öz direncinin azalması, toprak iletkenliğinin artması demek olduğundan toprak iletkenliği değişiminin potansiyel dağılımına etkisi doğrudan toprak bağıllı dielektrik sabiti değişiminin incelenmesi ile SFY kullanılarak kolaylıkla yapılabilir. Şekil 5'te görüldüğü gibi adım gerilimi, topraklayıcı yakınında hızlı bir şekilde azalmakta ve daha sonra topraklayıcıdan uzaklaştıkça daha yavaş bir şekilde azalmaktadır. Bu durumda topraklayıcı yakınında bulunan canlıların işletmedeki herhangi bir olumsuz durumda uğrayabilecekleri zararın, uzakta bulunan canlılara oranla daha fazla olabileceği görülmektedir.

Çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımının bulunması amacıyla oluşturulan Şekil 6'daki SEY modelinde ise yine referans toprak ve topraklayıcıyı da içeren kapalı bölge üçgen sonlu elemanlara ayrıştırılmıştır. Her bir elemanın enerjisinin minimumlaştırılması ilkesine göre hesaplamalar yapılarak topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı bulunmuştur. Hesaplamalarda, FEMM 4.0 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

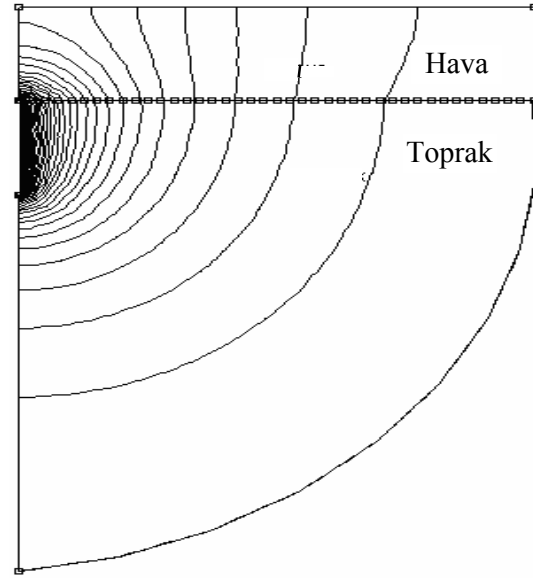


Şekil 6. Çubuk topraklayıcı için SEY modeli

SEY ile yapılan hesaplamalarda, SFY'de olduğu gibi topraklayıcıya 100 volt uygulandığı ve potansiyeli 0 volt olan toprak yüzeyinin de referans toprak olduğu kabul edilmiştir. SEY ile yapılan hesaplar sonucunda da topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerlerinin azalmakta olduğu görülür. Bu azalmanın oluşturduğu şekil bir çadıra benzediğinden bu potansiyel dağılımına potansiyel çadırı denir. Sonuç olarak gerek SFY gerekse SEY ile bulunan potansiyel dağılımlarının, daha önce bu konuda çeşitli yöntemlerle bulunan dağılımlarla uyumlu olduğu görülür. SEY'de çok daha hassas hesaplamalar yapılabilmesi için sınır koşulları bilinen bölgenin

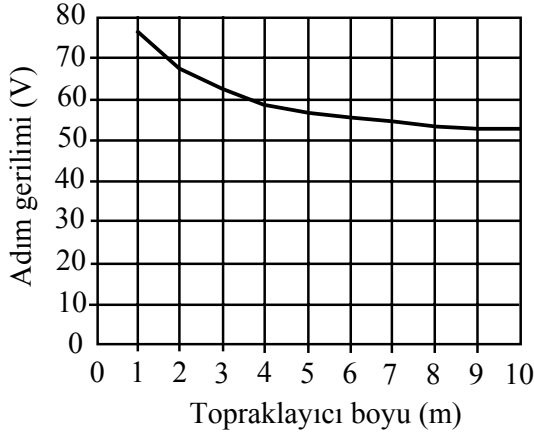
çok sayıda sonlu elemanlara ayrıştırılması gerekir.

Topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgilerinin bilinmesi, topraklayıcı çevresindeki potansiyel yoğunluğunu bilmek bakımından önemlidir. İki ayağı aynı eşpotansiyel çizgi üzerinde bulunan bir kişinin maruz kaldığı potansiyel farkı yani adım gerilimi sıfırdır. Ayakları farklı eşpotansiyel çizgiler üzerinde bulunan bir kişinin adım gerilimi ise sıfırdan farklı olur. Şekil 6'daki modelden SEY ile elde edilen eşpotansiyel çizgileri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcıya ilişkin eşpotansiyel çizgiler

Buna göre topraklayıcı yakınındaki eşpotansiyel çizgiler birbirlerine daha yaklaşmakta, topraklayıcıdan uzaklaştıkça birbirlerinden uzaklaşmaktadır. SEY ile elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi çubuk topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu dağılımların seyri azalmaktadır. Bu azalma topraklayıcı yakınında daha hızlı, topraklayıcıdan uzaklaştıkça ise daha yavaş olmaktadır. Çubuk topraklayıcının boyunun değişmesi durumunda SEY ile elde edilen Şekil 8'deki adım gerilimi grafiğinden görülebileceği gibi, topraklayıcı boyunun uzaması topraklayıcı yakınındaki adım geriliminin de düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 8. Adım geriliminin çubuk topraklayıcı boyu ile değişimi

Yarı küre topraklayıcı için potansiyel dağılımının sayısal analizi

Hem matematik hem de fizik bakımından teorik incelemeye en elverişli topraklayıcı şekli küredir. Kürenin çapı küçültülerek bir nokta haline getirilirse, bir noktasal kaynak elde edilir. Küresel topraklayıcının bütün özellikleri bir noktasal kaynağın özellikleri ile aynı olur. Potansiyel dağılımını ve yayılma direncini hesaplayabilmek için toprağın yarı küre topraklayıcıyı yine küresel olarak sardığı ve pratik olarak sonsuz bir büyüklüğü olduğu kabul edilir. Ayrıca toprağın çok uzakta çok iyi iletken bir tabaka ile kaplanmış olduğu, bundan başka topraklayıcının öz direncinin toprağinkinin yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilir. Topraklayıcı yarı küre ile uzaktaki iletken tabaka arasında U_{tk} (topraklayıcı gerilimi) uygulanırsa, bu ikisi arasından I_t gibi bir toprak akımı akar. Bu akım şiddetini, bu iki eş merkezli küresel elektrot arasındaki toprağın direnci belirler.

Çok uzaktaki iletken tabakanın potansiyelinin sıfır olduğu kabul edilirse, küre topraklayıcının merkezinden r uzaklıktaki bir noktanın potansiyeli

$$\phi = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right) = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \quad (7)$$

olur. Bu ifade, yer yüzeyindeki uzaklığa bağlı olarak potansiyel dağılımını verir. Burada ρ top-

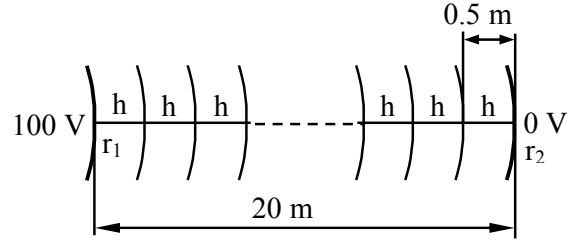
rak öz direncidir, I_t ise topraklayıcıdan geçen akımdır (Bayram, 2000).

Yarı küre topraklayıcı için SFY ve SEY ile potansiyel dağılımı bulunurken yarı küre topraklayıcıya 100 volt uygulandığı varsayımı yapılmış ve referans toprak olarak da 20 m uzaklıktaki toprak bölgesi alınmıştır.

Küresel koordinatlarda elektrik alanının sadece r koordinatı ile değişmesi durumunda Laplace denkleminin sonlu farklar ifadesi;

$$V(r+h) - 2V(r) + V(r-h) + \frac{h}{r} [V(r+h) - V(r-h)] = 0 \quad (8)$$

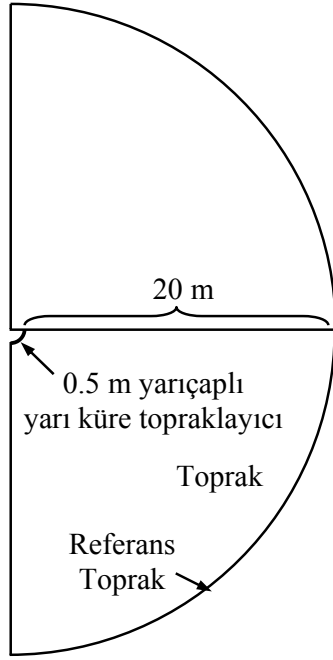
olur. Yarı küre topraklayıcının SFY ve SEY kullanılarak potansiyel dağılımının bulunması amacıyla oluşturulan modeller, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.



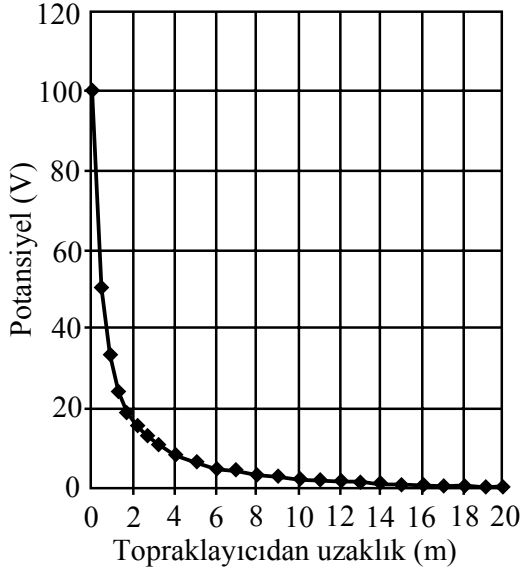
Şekil 9. Yarı küre topraklayıcı için SFY modeli

Bu yöntemlerin kullanılması sonucu elde edilen değerlere bakılırsa yarı küre topraklayıcının merkezinden uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmakta ve buna bağlı olarak da adım gerilimi düşmektedir.

0.5 m yarıçaplı bir yarı küre çevresinde meydana gelen potansiyel dağılımının SEY ile bulunması durumunda Şekil 11'de görüldüğü gibi yarı küre topraklayıcı yakınında potansiyel değerleri yüksektir, uzaklığa bağlı olarak bu değerler düşmektedir. Analitik olarak verilen (7) denkleminde de anlaşılacağı üzere küre merkezinden uzaklık olarak ifade edilen r değerinin artması, akımın ve toprak öz direncinin sabit olması durumunda toprak yüzeyindeki potansiyeli düşürmektedir. SFY ve SEY kullanılarak yapılan hesaplamalarda da bu sonuç elde edilmiştir.



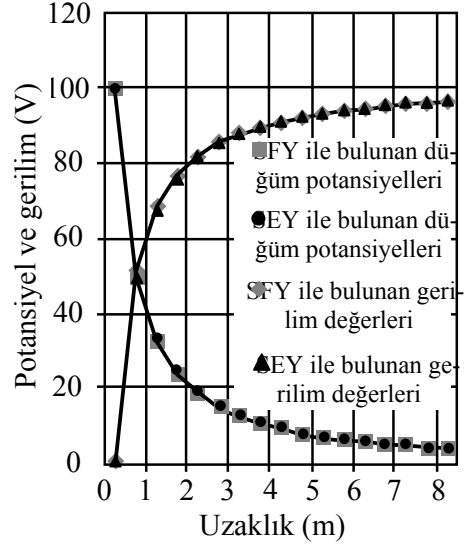
Şekil 10. Yarı küre topraklayıcı için SEY modeli



Şekil 11. Yarı küre topraklayıcı için SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

0.5 m yarıçaplı bir yarı küre topraklayıcının kullanılması durumunda elde edilen potansiyel dağılımı, topraklayıcının 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı olması durumunda elde edilen dağılıma benzemektedir. Topraklayıcıdan uzaklaştıkça elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri, yarı küre topraklayıcıda daha dü-

şüktür fakat adım gerilimleri yüksektir. Çubuk topraklayıcıda ise potansiyel değerleri yüksek buna karşılık adım gerilimleri düşüktür. Bu nedenle gerek maliyet gerekse koruma ve toprağa yerleştirilme açısından çubuk topraklayıcının yarı küre topraklayıcıya göre kullanılmasının daha elverişli olduğu söylenebilir. Küre topraklayıcı için SFY ve SEY ile elde edilen potansiyel dağılımları ve gerilim değişimleri Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Yarı küre topraklayıcı için SFY ve SEY ile bulunan potansiyel ve gerilim değişimleri

Potansiyel dağılımları, her iki yöntemle yapılan hesaplamalarda azalmaktadır. Buna bağlı olarak yarı küre yüzeyindeki potansiyelden, r kadar uzaklıktaki noktanın potansiyelinin çıkarılması ile elde edilen U geriliminin değişimi ise uzaklığa bağlı olarak artmaktadır. Şekil 12'den de görülebileceği gibi yarı küre topraklayıcı çevresindeki gerilim değişimi üç boyutlu olarak incelenirse bunun bir "gerilim hunisine" ve potansiyel dağılımının ise "potansiyel çadırı"na benzediği söylenebilir. Böylelikle daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen bu sonuçlara, bu çalışmada kullanılan bu yöntemlerle yapılan hesaplarla da ulaşıldığı görülmektedir.

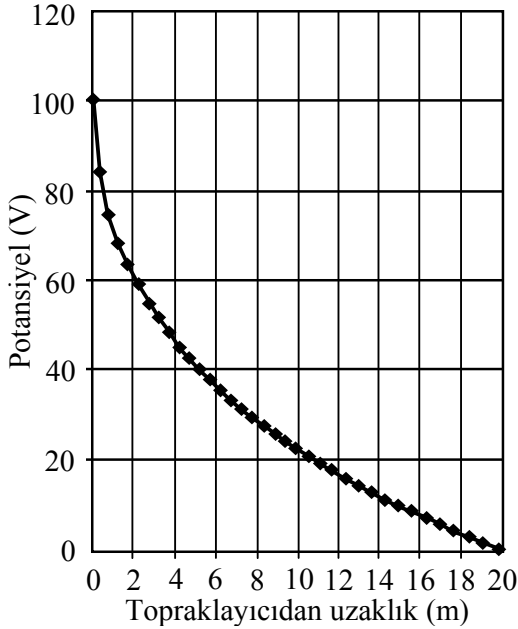
Şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımının sayısal analizi

Şerit topraklayıcılar en az 3 mm kalınlığında ve 100 mm² kesitinde galvanizli demir şeritten ya-

pılırlar. Bundan başka yuvarlak iletkenler veya örgülü teller de bu amaçla kullanılabilirler. Şerit topraklayıcılar çok derine gömülmezler. Onun için bunlara yüzey topraklayıcı adı da verilir. En basit şerit topraklayıcı, boylu boyuna döşenmiş bir şerittir. Bunun yayılma direnci, öncelikle şeridin uzunluğuna bağlıdır.

Şerit topraklayıcının SFY ile potansiyel dağılımının hesaplanmasında Şekil 3'te çubuk topraklayıcı için verilen model kullanılabilir. Sadece şerit topraklayıcı modelinde topraklayıcı yeryüzüne dik değil de paralel olarak yerleştirilmelidir.

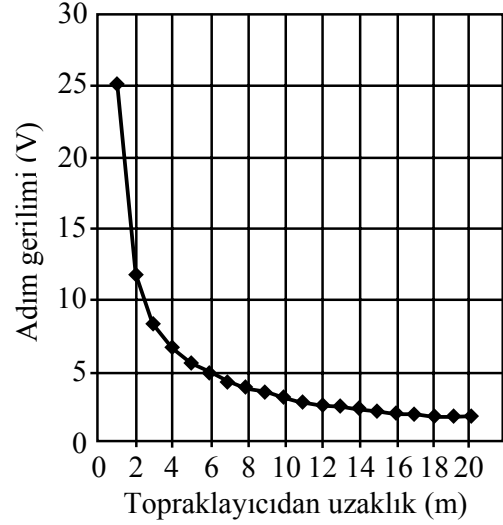
SFY ve SEY ile yapılan hesaplamalarda diğer iki topraklayıcı için kullanılan varsayımlar şerit topraklayıcı için de aynıdır. Buna göre 5 m uzunluğundaki bir şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı, SFY ile Şekil 13'te verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 13. 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için SFY ile bulunan potansiyel dağılımı

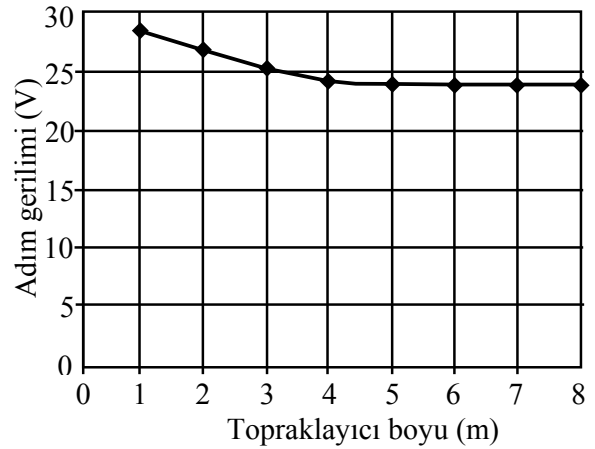
Şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, diğer topraklayıcılarda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Ancak bu azalma çubuk ve küre topraklayıcıda olduğu gibi hızlı bir şekilde olmayıp nispeten daha yavaş olmaktadır.

Çubuk ve küre topraklayıcı kullanılması durumunda topraklayıcıdan aynı uzaklıkta bulunan bir noktanın potansiyel değeri şerit topraklayıcı kullanılması durumunda daha yüksek olmaktadır. Buna bağlı olarak da topraklayıcı çevresinde oluşabilecek adım gerilimi ise Şekil 14'ten görüldüğü gibi çok daha düşük olmaktadır.



Şekil 14. 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için uzaklıkla adım gerilimi değişimi

Şerit topraklayıcının boyunun uzaması, adım gerilimini de Şekil 15'te görüldüğü gibi azaltmaktadır. Ancak topraklayıcı boyunun 10 m'den uzun olması durumunda adım geriliminde pek fazla bir değişiklik meydana getirmemektedir.



Şekil 15. Adım geriliminin şerit topraklayıcı boyu ile değişimi

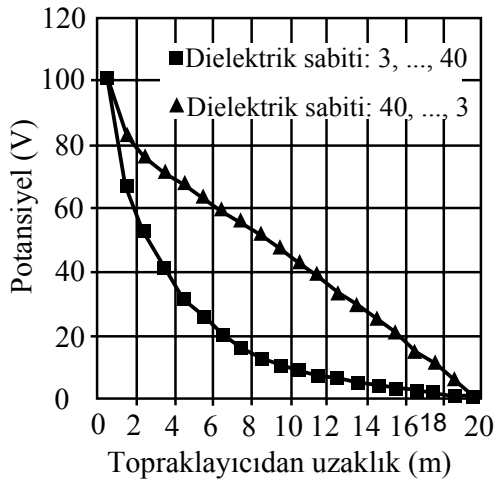
Seri ve paralel tabakalı toprak içinde şerit topraklayıcı

Literatürde bulunan çalışmalardan bazılarında toprak öz direnci ile birlikte buna karşılık gelen toprak bağıl dielektrik sabitleri de verilmektedir. Literatürden bu bilgiler toplanarak Tablo 1 oluşturulmuştur (Gonos, vd., 2003).

Tablo 1. Toprak öz dirençleri ve karşılık gelen bağıl dielektrik sabitleri

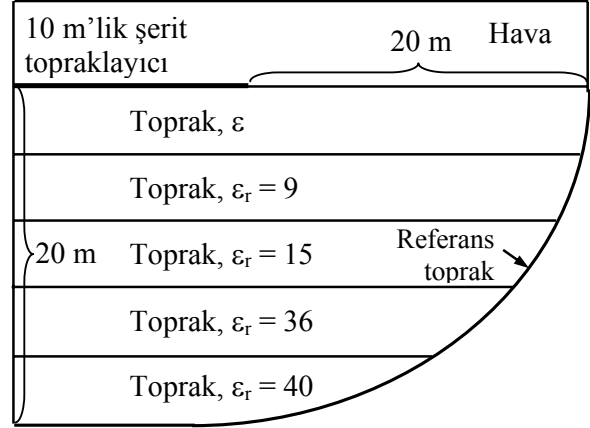
Toprak öz direnci ρ (Ωm)	1800	100	700	100	38
Bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r	3	9	15	36	40

Birbirine seri, farklı dielektrik sabitine sahip toprak yapısı içinde 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla oluşturulan model, Şekil 16'da verilmiştir. Bu çalışmada, incelemeler bu tür modeller üzerinde yapılmıştır. Topraklayıcının herbiri farklı dielektrik sabitli 4 m kalınlığındaki, seri tabakalı toprak yapısı içinde olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla öncelikle bağıl dielektrik sabiti, en üstteki toprak tabakasından başlayarak küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olacak biçimde beş tabakalı toprak içinde, sonrasında ise büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9, ve 3 olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır.



Şekil 16 Seri tabakalı toprak içindeki şerit topraklayıcı SEY modeli

Şekil 17'de seri toprak içindeki şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımları verilmiştir.



Şekil 17. Seri toprak içindeki şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımları

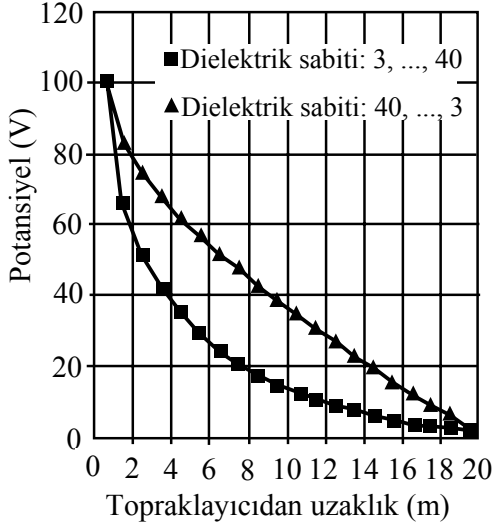
Şekil 17'den görüldüğü gibi toprak tabakalarının dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren küçükten büyüğe doğru artması durumunda elde edilen potansiyel dağılımı, topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızlı bir şekilde üstel olarak azalmaktadır. Toprak tabakalarının dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren büyükten küçüğe doğru azalması durumunda ise potansiyel değerleri yine topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Ancak bu azalmanın doğrusal bir azalmaya daha yakın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak da adım geriliminin de topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakta olduğu görülmüştür.

Son olarak, şerit topraklayıcının, topraklayıcıya dik toprak tabakaları içinde olması durumu ele alınmıştır. Bu durumda topraklayıcı uzunluğunun yarısından itibaren toprak bağıl dielektrik sabitinin değiştiği düşünülerek yapılan hesaplamalardan elde edilen potansiyel dağılımları, Şekil 18'de gösterilmiştir.

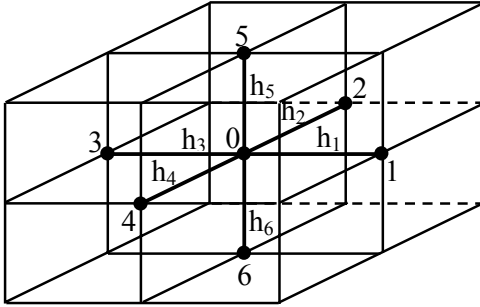
Şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımının sonlu farklar yöntemi ile üç boyutlu hesabı

Bir şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımının SFY ile üç boyutlu hesaplanması amacıyla Şekil 19'da verilen ağ örneği göz önüne alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ve hücresel çözüm yöntemi adını verdiğimiz bir yöntem ile üç boyutlu Laplace denkleminin sonlu farklar ifadesinden elde edilen denklemler kolaylıkla çözümlenmiştir. Üç boyutlu ağ örneğinden görüleceği gibi potansiyeli bilinmeyen noktanın değeri kendisine komşu altı adet noktanın değerine bağlıdır.



Şekil 18. Paralel toprak içindeki şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımları

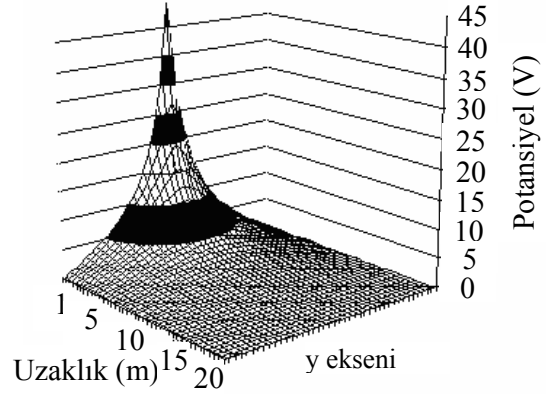


Şekil 19. Üç boyutlu ağ örneği

Buna göre 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde, üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile yapılan potansiyel hesaplamaları sonucunda, topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyelin ve adım geriliminin azaldığı ve potansiyel dağılımının simetrik olduğu görülür (Şekil 20).

Topraklayıcıların çevrelerindeki potansiyelin iki boyutlu SFY ile yapılan sayısal analizlerinde kullanılan tablolama programındaki çözüm yön-

teminde, sonlu farklarla yazılmış bir düğüme ilişkin potansiyel denklemi, tablolama programındaki o düğüme karşılık gelen hücrenin denklemi olarak yazılarak benzeşim yapılmıştır. Tüm düğüm potansiyelleri bu şekilde kolaylıkla hesaplanmıştır. İki boyutlu analizlerde bir düğümün potansiyeli çevresindeki dört düğüme bağlı olarak bulunurken, üç boyutlu analizlerde ise yine aynı yöntem ile bir düğümün potansiyelinin çevresindeki altı düğüme bağlı olarak kolay ve hızlı bir şekilde bulunabilir. Böylece topraklayıcıların enine, boyuna ve yüksekliği boyunca potansiyel dağılımının kolaylıkla çıkartılabileceği gösterilmiştir.



Şekil 20. 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için üç boyutlu potansiyel dağılımı

Sonuçlar

Bu çalışmayla bir topraklayıcı çevresinde oluşan potansiyel dağılımlarının sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yeni bir yaklaşımla yapılabileceği ortaya konulmuştur. Bu yöntemlerin kullanımıyla elde edilen denklemlerin çözümü aşamasında bir tablolama programında kısa sürede, kolaylıkla çözüme ulaşılabilecek yeni bir yöntem geliştirilmiştir. SFY ve SEY ile kurulan modeller ve bu modeller üzerinde yapılan hesaplamalar, topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyelin azaldığını ve buna bağlı olarak da adım geriliminin düştüğünü göstermiştir. Bu durum daha önce bu konuda yapılan çalışmalarla uyum göstermektedir.

Özellikle potansiyel dağılımı üzerinde toprak yapısının değişiminin etkisi incelenirken, toprak

özdirenci yerine toprak bağıl dielektrik sabitinin alınması gerektiği durumlarda bu yöntemlerin kullanılması oldukça elverişlidir. Çubuk ve yarı küre topraklayıcının bu yöntemlerle yapılan hesaplamalarında topraklayıcı yakınında bulunan noktaların potansiyel değerlerinin düşük buna bağlı olarak adım gerilimi yüksektir. Şerit topraklayıcıda ise topraklayıcı yakınında bulunan noktalarda potansiyel değerleri yüksek buna bağlı olarak da adım gerilimi düşüktür. Şerit topraklayıcının yerleştirildiği toprağın seri tabakalı olması ve üst tarafı kuru alta doğru nemlilik oranının artması durumunda elde edilen potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakta ancak bu azalma üstel bir azalmaya benzerken, üst tarafı nemli alta doğru kuru olan bir toprak yapısı içinde olması durumunda ise bu azalma doğrusal bir azalmaya benzemektedir. Toprak iletkenliğinin üstten alta doğru azalması durumunda potansiyel değerleri, iletkenliğinin üstten alta doğru artmasındakinden daha büyüktür. Toprağın paralel tabakalı ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça nemlilik oranının düşmesi durumunda potansiyel dağılımı dalgalı bir şekilde azalma gösterir.

Kaynaklar

- Bayram M., (2000). *Elektrik tesislerinde topraklama*, 223, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Chonghui, L., Jin liang, H., Yanqing, G., Rong, Z., ve Jun, Z., (2003). Effective length of extended

- earthing electrode under lightning impulse, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- Dawalibi, F. ve Mukhedkar, D., (1979) Influence of ground rods on grounding grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **98**, 2089-2098.
- Geri A., (2000) Practical design criteria of grounding system under surge conditions, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- Gonos, I. F., Kontargyri, V. T., Topalis, F. V., ve Stathopoulos, I. A., (2003). Transient behaviour of a horizontal electrode under impulse current, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- Heimbach, M., ve Grcev, L. D., (1997). Grounding system analysis in transient programs applying electromagnetic field approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 186-193.
- Kalenderli, Ö., (1996). *Elektrik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi*, Ders Notları, İ.T.Ü., İstanbul.
- Kaşıkçı İ., (2002). *Elektrik tesislerinde topraklama yönetmeliği uygulamaları*, 235 sf., İstanbul.
- Lorentzou M. I., ve Hatziargyriou N. D., (2000). Effective dimensioning of extended grounding systems for lightning protection, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- Thapar, B., ve Puri, K., (1967). Mesh potential in high voltage grounding grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **86**, 249-254.